



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)







Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Температурный коэффициент линейного расширения вольфрамокобальтовых твердых сплавов

Игорь Ефимович ^{a, *}, Иван Золотухин ^b, Евгений Завьялов ^c

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9060-4988>,  egor_kosin@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1517-9117>,  ivan.zolotukhin@mail.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0002-1704-4734>,  zavjaloves@tyuiu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.018.25:536.413.2

История статьи:

Поступила: 10 июня 2019
 Рецензирование: 09 июля 2019
 Принята к печати: 15 августа 2019
 Доступно онлайн: 15 сентября 2019

Ключевые слова:

Термомеханические свойства материалов
 Температурный коэффициент линейного расширения
 ТКЛР
 Тепловая деформация
 Тепловое расширение твердых тел
 Дилатометрия
 Твердые сплавы группы ВК
 Твердый сплав WC-Co
 Однокарбидный твердый сплав
 Двухфазный твердый сплав
 Вольфрамокобальтовый твердый сплав

АННОТАЦИЯ

Введение. Изделия, содержащие твердые сплавы и работающие при высоких температурах, испытывают большие температурные деформации, точность расчета которых зависит от точности температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). В литературных источниках данные по значениям ТКЛР для твердых сплавов значительно разнятся: не указаны тип ТКЛР, условия проведения экспериментов и часто игнорируется факт зависимости ТКЛР от температуры. Предметом исследования является ТКЛР вольфрамокобальтовых твердых сплавов с различной концентрацией кобальта по массе в диапазоне 3...20 %. **Цель работы** – получение зависимостей деформации твердых сплавов с разной концентрацией кобальта от температуры и уточнение значений ТКЛР с учетом его изменения от температуры. **Методы.** Исследования проводились на дилатометре Netzsch 402 PC в воздушной среде. Для исключения искажений показаний на начальном участке нагрева, обусловленных конструктивными особенностями дилатометров с толкателями, применен специальный метод обработки результатов. Он включает в себя расчет по полученным на дилатометре абсолютным удлинениям образца дифференциальных (истинных) ТКЛР, их аппроксимацию линейной функцией с последующим ее интегрированием по температуре для получения зависимости относительной деформации от температуры. **Результаты и обсуждение.** Получены экспериментальные значения температурных деформаций твердых сплавов в диапазоне от 20 до 650 °C и рассчитаны значения дифференциальных ТКЛР. Выявлена линейная зависимость дифференциального ТКЛР от температуры, приведены коэффициенты аппроксимирующих функций для разных концентраций кобальта. Выведены зависимости относительных температурных деформаций твердых сплавов от температуры для разных концентраций кобальта и приведены коэффициенты аппроксимирующих полиномов. Установлено, что с увеличением концентрации кобальта линейно увеличиваются значения ТКЛР и скорость его изменения. Приведена обобщенная формула, позволяющая рассчитать относительную температурную деформацию и ТКЛР по известной температуре и концентрации кобальта. Полученные результаты могут быть использованы в задачах расчета тепловых деформаций и напряжений в изделиях, содержащих вольфрамокобальтовые твердые сплавы.

Для цитирования: Ефимович И.А., Золотухин И.С., Завьялов Е.С. Температурный коэффициент линейного расширения вольфрамокобальтовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 129–140. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140.

Введение

Двухфазные металлокерамические твердые сплавы группы ВК получили широкое распространение в различных отраслях промышленности. Зачастую изделия, содержащие эти сплавы, работают в диапазоне высоких температур и, как

следствие, испытывают большие температурные деформации. От точности расчета температурных деформаций зависят эксплуатационные характеристики подобных изделий, в связи с чем возникает необходимость в определении точных значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) твердых сплавов.

ТКЛР используется для расчета температурных деформаций и напряжений: в посадках с натягом; в деталях механизмов и приборов [1]; в рабочей части режущего, горного, бурового, PDC инструментов при их изготовлении и экс-

*Адрес для переписки

Ефимович Игорь Аркадьевич, к.т.н., доцент
 Тюменский индустриальный университет,
 ул. Володарского, 38,
 625000, г. Тюмень, Россия
 Тел.: +7 (3452) 50-49-15, e-mail: egor_kosin@mail.ru

платации [2, 3]; в функциональных покрытиях, наносимых на твердосплавную основу [4–6]; а также в твердосплавных покрытиях, полученных аддитивными технологиями, в том числе лазерной наплавкой. Возникает необходимость знания ТКЛР в лазерной термометрии [7], в частности, в разработанном авторами методе измерения температурных полей, основанном на регистрации температурных деформаций методом лазерной интерферометрии [8]. Точные значения ТКЛР также могут помочь в изучении процессов

спекания и контроле качества изделий из твердых сплавов.

Значения ТКЛР для твердых сплавов с различной номинальной концентрацией кобальта по массе, полученные разными исследователями, приведены в табл. 1 (в скобках указаны расчетные значения, полученные из аппроксимирующих функций или математических моделей, представленных в соответствующих источниках). Жирным шрифтом выделены экстремальные значения.

Таблица 1

Table 1

Значения ТКЛР ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) вольфрамокобальтовых твердых сплавов с различной номинальной концентрацией кобальта по массе

The TCLE ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) of tungsten-cobalt cemented carbide with different cobalt content by weight

Температура, $^{\circ}\text{C}$ / Temperature, $^{\circ}\text{C}$	Номинальная концентрация кобальта (по массе) n , % / Cobalt content (by weight) n , %											Источник / Reference
	3	4	6	8	10	11	13	15	16	20	25	
20...100			4,5				5,2					[9]
100...200			5,1				5,9					
300...400			5,9				6,7					
0...300		3,4	3,6			3,8				4,7	5,0	[10]
300...600		4,1	4,6			4,8				6,2	6,7	
–			5,0					6,0				
20...800	4,1	4,4...4,7	4,4...4,9	4,8...5,1	5,2			6,0		5,7		[11]
–	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3							[12]
200	4,0		4,3		5,2				5,8		6,3	[13,14]
1000			5,4...5,9						7,0			
30...400	(4,85)	(4,98)	(5,24)	(5,48)	(5,72)	(5,84)	(6,07)	(6,30)	(6,41)	(6,83)	(7,33)	[15]
100...900			5,7... 6,0									[16]
–			5,5								7,5	[17]
600	(5,28)	(5,4)	5,7...5,8	5,9	5,9... 6,2	6,1... 6,2	(6,47)	6,8	6,9	(7,21)	(7,69)	[18]
20...800	4,6		5,0	5,5			6,0			6,6	6,8	[19]
20...900			5,87									[20]
–		(5,39)	(5,49)	(5,59)	(5,7)				(6,04)	(6,28)		[21]
150...600										7,55		[22]

Согласно приведенным источникам связи между размером зерен карбидной фазы и величиной ТКЛР не выявлено [15, 18]. Значения ТКЛР в работе [21] получены расчетным путем, в остальных – экспериментальным. В работе [9] на основе данных, полученных с помощью интерференционного дилатометра, установлено, что ТКЛР для диапазона температур 20...400 °C не постоянен и линейно увеличивается с ростом температуры.

Анализ представленных значений ТКЛР позволяет выявить следующие закономерности. ТКЛР твердых сплавов имеет относительно малые значения, например, примерно в два раза меньше по сравнению с конструкционными сталями. С увеличением концентрации кобальта ТКЛР увеличивается. Чем шире рассматриваемый температурный диапазон, тем большие значения ТКЛР наблюдаются при одинаковой концентрации кобальта.

Однако данные по значениям ТКЛР для сплавов с одинаковой концентраций кобальтовой фазы значительно разнятся. В большинстве случаев в рассмотренных работах не указан способ расчета ТКЛР и не приведены условия проведения экспериментов, например скорость нагрева, тип используемой среды, тип дилатометра и др. Часто также не указано, к какому типу – дифференциальному (истинному) или интегральному (среднему) – относятся приводимые значения ТКЛР [23, 24]. Кроме того, в большинстве случаев игнорируется факт зависимости ТКЛР от температуры.

Задачей данного исследования является получение зависимостей деформации твердых сплавов группы ВК с разной концентрацией кобальтовой фазы от температуры и уточнение значений ТКЛР с учетом его изменения с ростом температуры.

Методика исследований

Экспериментальные исследования осуществлены на дилатометре Netzsch 402 РС, который относится к наиболее распространенному типу дилатометров с одним толкателем.

Держатель образцов и толкатель дилатометра выполнены из керамики Al_2O_3 . Исследуемый образец находится в воздушной среде. В ходе эксперимента скорость нагрева образца

составляла 7 °C/мин. Толкатель прижимался к образцу с усилием $35 \cdot 10^{-2}$ Н. Температура исследуемого образца измерялась с помощью расположенной в непосредственной близости от образца штатной платиновой термопарой. Измерительный преобразователь для защиты датчика и снижения образования окалина обдувался азотом, расход которого составляет 30 мл/мин.

В эксперименте для каждой номинальной концентрации кобальта по массе использовалось по три исследуемых образца. Образцы изготавливались из серийно-выпускаемых твердосплавных пластин разных партий, по составу соответствующих группе ВК, ГОСТ 3882–74 [25]. Размер зерен карбидов вольфрама, используемых при спекании, по данным производителя составлял 4,0...9,0 мкм (по Фишеру). Фактические размеры зерен в исследуемых образцах не определялись. Образцы имели призматическую форму квадратного сечения 5×5 мм. Номинальная длина образцов составляла 25 мм и соответствовала длине эталонного образца, использованного при калибровке дилатометра. Торцы образцов, контактирующие с держателем и толкателем, были отшлифованы алмазным кругом, что обеспечивало снятие поверхностного слоя, полученного при спекании заготовок. Длина каждого образца измерялась при начальной температуре микрометрической скобой с точностью до 1 мкм.

Последовательность действий при осуществлении эксперимента включала в себя общую для всей серии опытов калибровку дилатометра по штатному эталонному образцу из Al_2O_3 со скоростью нагрева 7 °C/мин, определение длины исследуемого образца проводилось по трем измерениям микрометрической скобой при начальной температуре, нагрев исследуемого образца с постоянной скоростью нагрева 7 °C/мин до 650 °C. При этом регистрация абсолютной деформации образца и его температуры велась непрерывно с частотой 60 раз в минуту. Выбор верхнего предела нагрева исследуемого образца связан со снижением достоверности измеряемой деформации из-за деградации поверхностного слоя твердых сплавов в воздушной среде при высоких температурах.

Для примера на рис. 1 представлен график зависимости абсолютной деформации образца от температуры для сплава с номинальной концентрацией кобальта 6 %. Из-за конструктив-

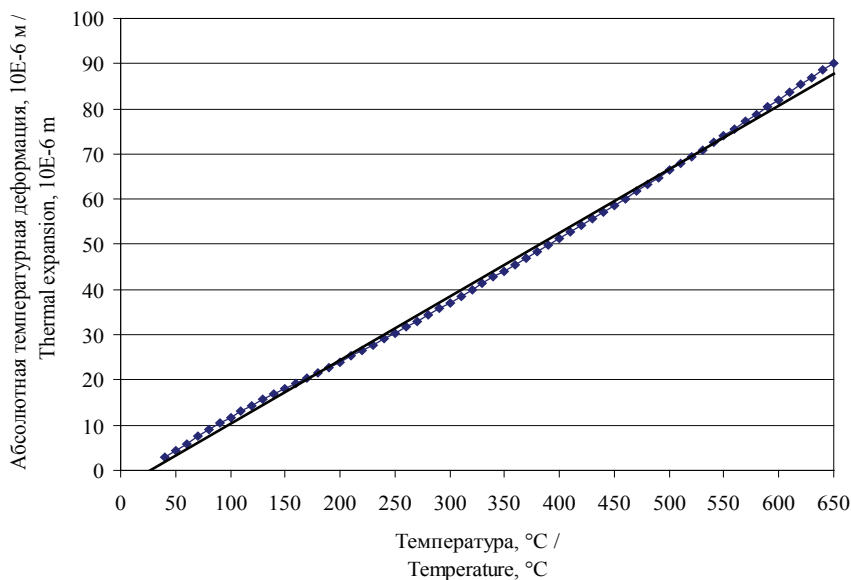


Рис. 1. Зависимость абсолютной температурной деформации образца с номинальной концентрацией кобальта 6 % (по массе) от температуры

Fig. 1. Relationship of thermal coefficient of linear expansion of tungsten-cobalt cemented carbide with nominal cobalt content 6 wt. % on temperature

ных особенностей дилатометров с толкателями [24] на начальном этапе нагрева наблюдается изменение кривизны графика, обусловленное выборкой зазоров в механической части дилатометра. Аппроксимация данного графика линейной функцией по критерию суммы наименьших квадратов, т. е. использование среднего значения ТКЛР на всем температурном диапазоне, приводит к погрешностям расчета деформации. Использование же для определения ТКЛР только точек, полученных при высоких температурах, приводит к еще большим погрешностям расчета деформации в диапазоне низких и средних температур. Оба варианта расчета получили наибольшее распространение на практике.

Для уменьшения этих погрешностей предлагается специальный метод обработки результатов эксперимента. Экспериментальные данные абсолютных удлинений Δl_i образца для получения значений с одинаковым шагом по температуре интерполируют линейной зависимостью по соседним точкам. Затем переводят в относительную деформацию ε_i , используя длину l_0 образца, полученную при начальной стандартной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_0}.$$

Далее рассчитывают дифференциальный ТКЛР α_D при различных температурах T_i :

$$\varepsilon_{Di} = \frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}}{T_{i+1} - T_{i-1}}.$$

Зависимость дифференциального ТКЛР (среднего по трем образцам) от температуры на ее линейном участке аппроксимируют по критерию наименьших квадратов линейной функцией

$$(\alpha_{Di}) = aT_i + b.$$

Путем интегрирования по температуре из данного выражения получают функцию относительной температурной деформации в обобщенном виде:

$$\varepsilon_i = \frac{a}{2} T_i^2 + bT_i + c.$$

Неизвестный коэффициент c определяют из условия равенства $\varepsilon_i = 0$ при стандартной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$:

$$c = -20(10a + b).$$

Если ввести для упрощения обозначения $A = a/2$, $B = b$, $C = c$, то получим

$$\varepsilon_i = AT_i^2 + BT_i + C.$$

Ввиду непостоянства ТКЛР при изменении температуры и, как следствие, нелинейности зависимости относительной деформации ε_i образца от температуры наиболее рационально в качестве характеристики температурного расширения материала использовать вместо интегрального ТКЛР коэффициенты полинома относительной температурной деформации A , B и C .

Обработка результатов эксперимента производилась стандартными средствами MS Excel.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлен график зависимости значений дифференциального ТКЛР (среднего по трем образцам) от температуры для сплавов с разной номинальной концентрацией кобальта по массе. Сплошные линии соответствуют аппроксимирующим полиномам. Значительный

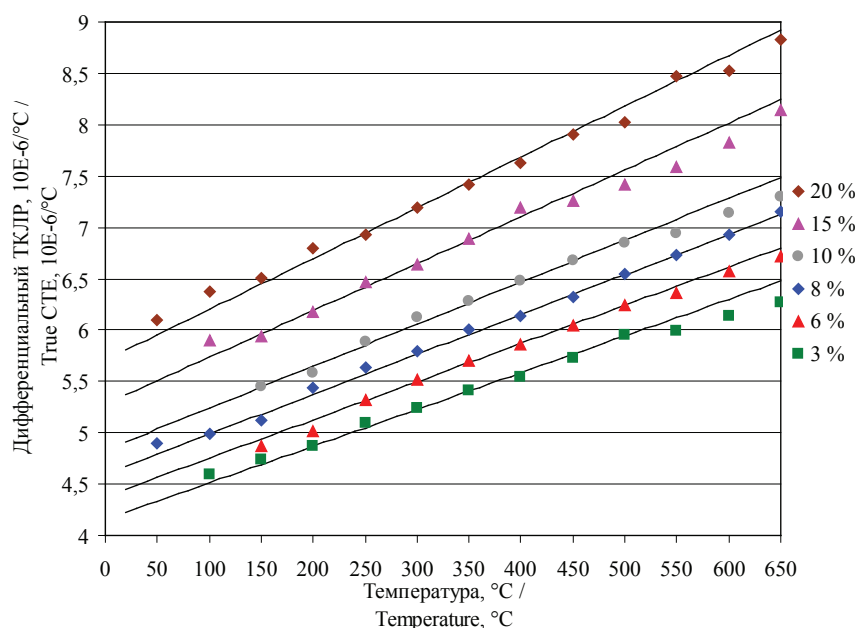


Рис. 2. Зависимость дифференциального ТКЛР (среднего по трем образцам) от температуры для вольфрамокобальтовых твердых сплавов с разной номинальной концентрацией кобальта по массе

Fig. 2. Relationship of the three sample averaged true TCLE on temperature for tungsten-cobalt cemented carbide with different nominal cobalt content by weight

местами разброс точек обусловлен чувствительностью дифференциального значения к локальной зашумленности исходных данных.

Из графиков, представленных на рис. 2, следует, что дифференциальный ТКЛР с увеличением температуры увеличивается линейно. С увеличением концентрации кобальта увеличиваются значения ТКЛР, также увеличивается и скорость изменения ТКЛР (угол наклона графика) в зависимости от концентрации кобальта.

Коэффициенты a , b аппроксимирующих полиномов дифференциального ТКЛР представлены в табл. 2.

$$\varepsilon_i = (A_1 n + A_2) T_i^2 + (B_1 n + B_2) T_i + (C_1 n + C_2).$$

Для оценки точности полученной обобщенной формулы рассмотрены зависимости дифференциальных ТКЛР (средних по трем образцам) от температуры для разных номинальных концентраций кобальта. Отклонение значений ТКЛР обусловлено погрешностями измерительного оборудования и разбросом свойств исследуемого материала. Наибольшее отклонение значения дифференциального ТКЛР от значения, определенного по обобщенной формуле,

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты полинома дифференциального ТКЛР вольфрамокобальтовых твердых сплавов с различной концентрацией кобальта по массе

Polynomial coefficients for true TCLE of tungsten-cobalt cemented carbide with different cobalt content by weight

Коэффициент / Coefficient	Номинальная концентрация кобальта (по массе) n , % / Cobalt content (by weight) n , %					
	3	6	8	10	15	20
a	$3,58 \cdot 10^{-3}$	$3,72 \cdot 10^{-3}$	$3,88 \cdot 10^{-3}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	$4,56 \cdot 10^{-3}$	$4,95 \cdot 10^{-3}$
b	4,15	4,38	4,60	4,83	5,28	5,71

Таблица 3

Table 3

Коэффициенты полинома относительной температурной деформации вольфрамокобальтовых твердых сплавов с различной концентрацией кобальта по массе

Polynomial coefficients for relative thermal expansion of tungsten-cobalt cemented carbide with different cobalt content by weight

Коэффициент / Coefficient	Номинальная концентрация кобальта (по массе) n , % / Cobalt content (by weight) n , %					
	3	6	8	10	15	20
A	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$
B	4,15	4,38	4,60	4,83	5,28	5,71
C	-83,8	-88,4	-92,7	-97,4	-106	-115

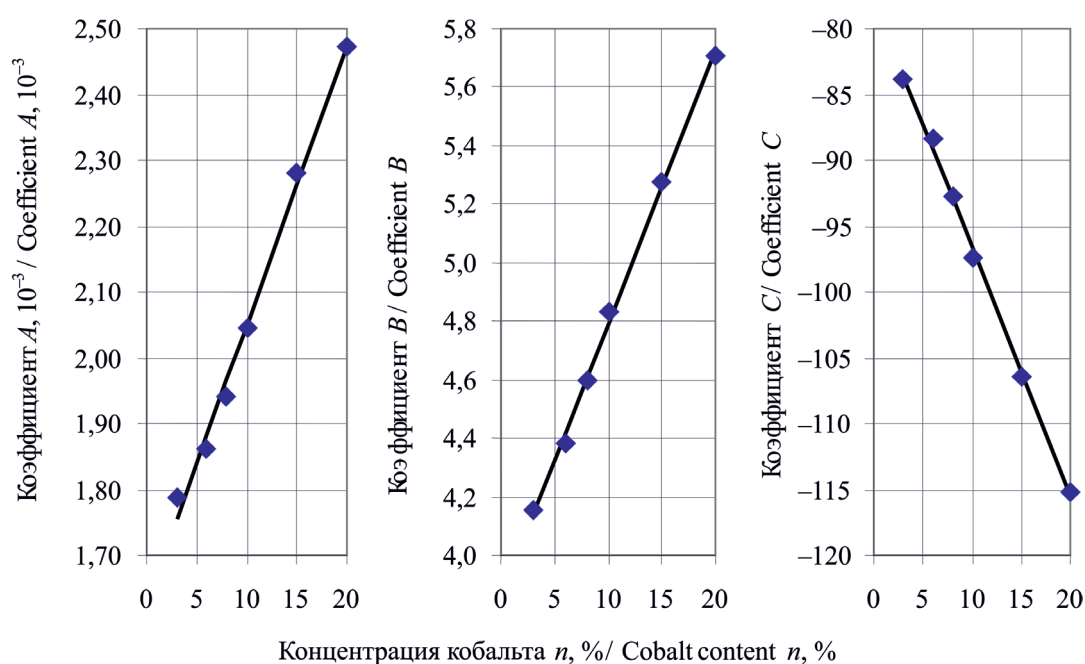


Рис. 3. Зависимость коэффициентов A , B , C полинома относительной температурной деформации вольфрамокобальтовых твердых сплавов от номинальной концентрации кобальта по массе

Fig. 3. Relationship of polynomial coefficients A , B , C for tungsten-cobalt cemented carbide relative thermal expansion on nominal cobalt content by weight

Таблица 4

Table 4

Коэффициенты полинома относительной температурной деформации вольфрамокобальтовых твердых сплавов

Polynomial coefficients for relative thermal expansion of tungsten-cobalt cemented carbide

Коэффициенты полинома	A_1	A_2	B_1	B_2	C_1	C_2
Значение / Value	$4,22 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	0,0932	3,86	-1,88	-77,9
Коэффициент детерминации R^2 / Coefficient of determination R^2	0,993		0,998		0,998	

составило $0,17 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ для номинальной концентрации кобальта 15 %. Поэтому возможный разброс значений дифференциального ТКЛР во всем диапазоне температур принят $\Delta\alpha_{Di} = \pm 0,17 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. После интегрирования этого выражения по температуре, учитывая, что при $T_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ погрешность $\Delta\varepsilon_i = 0$ (так как $\varepsilon_i = 0$), получим погрешность расчета температурной деформации $\Delta\varepsilon_i = \pm(0,17T_i - 3,4) \cdot 10^{-6}$. Из данного выражения следует, что погрешность расчета ε_i зависит от температуры и увеличивается с ее ростом.

По обобщенной формуле температурной деформации ε_i рассчитаны ТКЛР для разных кон-

центраций кобальта. Расчет интегральных ТКЛР α_{li} производится по формуле

$$\alpha_{li} = \frac{\varepsilon_i}{T_i - 20}.$$

Формулой для расчета дифференциального ТКЛР α_{Di} является первая производная обобщенной формулы температурной деформации ε_i :

$$\alpha_{Di} = 2(A_1n + A_2)T_i + (B_1n + B_2).$$

Графики расчетных значений ТКЛР представлены на рис. 4, из которых следует, что интегральный ТКЛР в диапазоне температур от 20 до 650 $^{\circ}\text{C}$ увеличивается в среднем на $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, что составляет около 27 % от значения ТКЛР

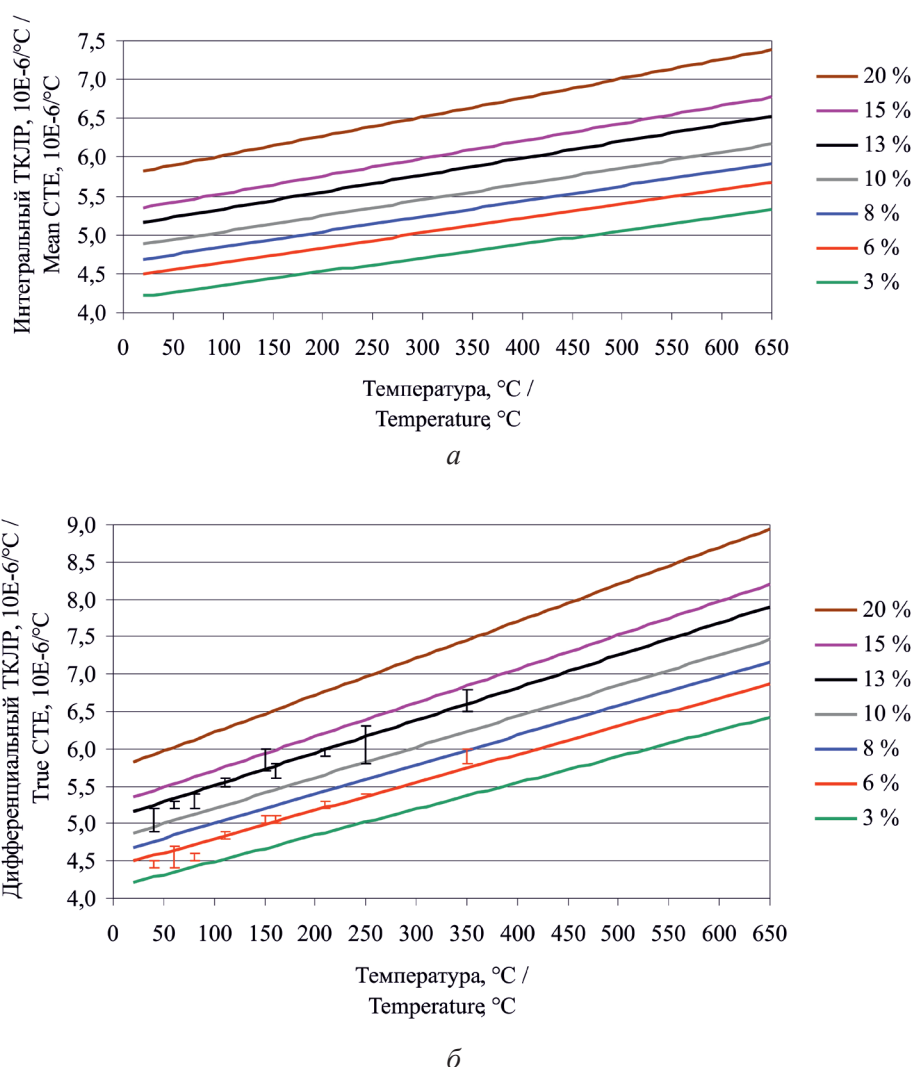


Рис. 4. Зависимость интегрального (а) и дифференциального (б) ТКЛР от температуры для вольфрамокобальтовых твердых сплавов с разной концентрацией кобальта по массе

Fig. 4. Relationship of mean (a) and true (b) TCLE on temperature for tungsten-cobalt cemented carbide with different cobalt content by weight

при стандартной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Дифференциальный ТКЛР в том же диапазоне не увеличивается в среднем на $2,7 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, что составляет примерно 55 % от значения ТКЛР при стандартной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

На рис. 4 также отмечены доверительными диапазонами значения дифференциального ТКЛР для сплавов с номинальной концентрацией кобальта 6 и 13 %, полученные в работе [9]. Сопоставление представленных данных показывает хорошую корреляцию результатов.

На рис. 5 представлены сравнительные данные ТКЛР из различных источников (см. табл. 1), а также графики интегральных ТКЛР α_{Li} , рассчитанных с использованием обобщенной формулы температурной деформации ε_i при температуре 20,1 и 650 °С. Большинство известных значений лежит в пределах расчетных границ. Характер зависимости ТКЛР от концентрации кобальта для [9, 15, 18] совпадает с полученным результатом. Значения ТКЛР, полученные в работе [10] для диапазона 0...300 °С, следует признать сильно заниженными. Разброс значений внутри границ объясняется различием в рассматриваемых температурных диапазонах и в используемых методиках расчета ТКЛР.

Приведенные сопоставления свидетельствуют, что полученные результаты хорошо согласуются с данными других исследователей.

Выводы

Получены экспериментальные значения температурных деформаций для вольфрамокобальтовых твердых сплавов в диапазоне от 20 до 650 °С, по которым рассчитаны значения дифференциальных (истинных) ТКЛР для данного диапазона.

Выявлена линейная зависимость дифференциального (истинного) ТКЛР от температуры, приведены коэффициенты аппроксимирующих линейных функций для разной концентрации кобальта.

Получены зависимости относительных температурных деформаций твердых сплавов с раз-

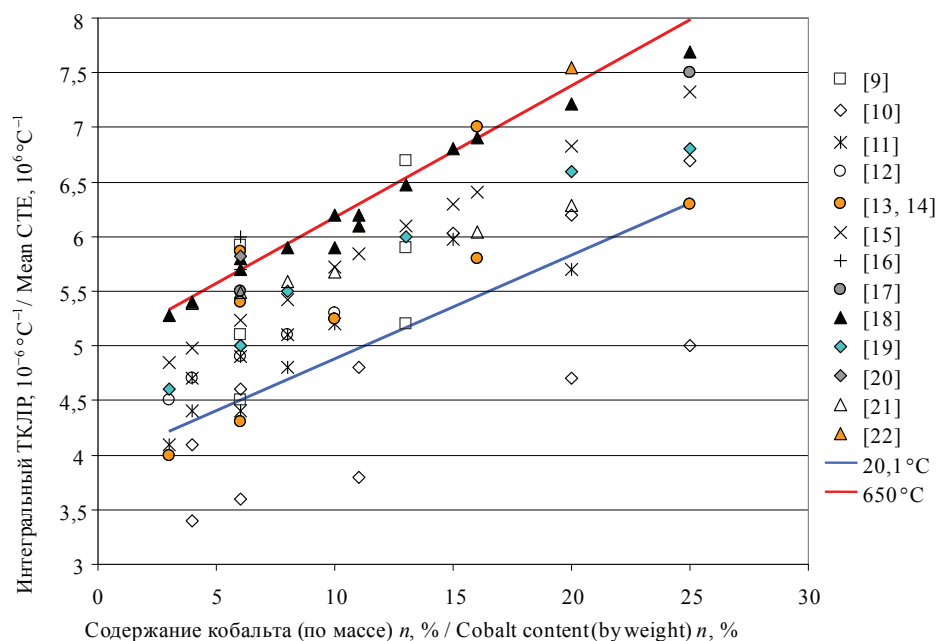


Рис. 5. Сравнение полученных значений интегрального ТКЛР со значениями из различных источников

Fig. 5. Comparison of mean TCLE obtained in the present investigation for different temperature with data from previous observers

личной концентрацией кобальта от температуры и приведены коэффициенты аппроксимирующих полиномов.

Установлено, что с увеличением концентрации кобальта линейно увеличиваются значения ТКЛР и скорость его изменения (угол наклона графика). Приведена обобщенная формула, позволяющая рассчитать относительную температурную деформацию, дифференциальный и интегральный ТКЛР вольфрамокобальтовых твердых сплавов по известной температуре и концентрации кобальта.

Список литературы

1. Hou W.-M., Thalmann R. Thermal expansion measurement of gauge blocks // Proceedings SPIE. – 1998. – Vol. 3477: Recent developments in optical gauge block metrology. – P. 272–278. – DOI: 10.1117/12.323116.
2. FEM analysis on the effect of cobalt content on thermal residual stress in polycrystalline diamond compact (PDC) / Z. Li, H. Jia, H. Ma, W. Guo, X. Liu, G. Huang, R. Li, X. Jia // Science China Physics, Mechanics and Astronomy. – 2012. – Vol. 55. – P. 639–643. – DOI: 10.1007/s11433-012-4654-4.
3. Patent US 8323372, IPC C 22 C 29/00 (2006.01). Low coefficient of thermal expansion cermet compositions / Z. Fang, A. Griffo, G.T. Lockwood, D.-B. Liang. – Appl. N 09/494,877; filed 31.01.2000; publ. 04.12.2012.

4. Thermophysical and microstructural studies on thermally sprayed tungsten carbide-cobalt coatings / S. Thiele, K. Sempf, K. Jaenicke-Roessler, L.-M. Berger, J. Spatzier // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20, iss. 1–2. – P. 358–365. – DOI: 10.1007/s11666-010-9558-0.

5. Diamond film deposition on WC–Co and steel substrates with a CrN interlayer for tribological applications / M. Chandran, A. Hoffman // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2016. – Vol. 49, N 21. – DOI: 10.1088/0022-3727/49/21/213002.

6. Altıparmak S. Analysis of thermal expansion and micro-delamination phenomenon of cutting tool thin surface coatings in high-speed dry machining [Electronic resource] // *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*. – 2018. – Vol. 4, iss. 2. – P. 189–211. – URL: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/618756> (accessed 16.08.2019).

7. Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с. – ISBN 5-9221-0222-2.

8. Патент 2442967 Российская Федерация, МПК G 01 K 5/48, B 23 Q 11/00 (2006.01). Способ определения температурных полей в режущей части инструмента в процессе резания / И.А. Ефимович, И.С. Золотухин, Е.И. Швецова. – № 2010134543/28; заявл. 18.08.10; опубл. 20.02.12, Бюл. № 5.

9. Hidnert P. Thermal expansion of cemented tungsten carbide [Electronic resource] // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. – 1936. – Vol. 18. – P. 47–52. – URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/18/jresv18n1p47_A1b.pdf (accessed 16.08.2019).

10. Киффер Р., Бенезовский Ф. Твердые сплавы. – М.: Металлургия, 1971. – 392 с.

11. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.

12. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: справочник / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с. – ISBN 5-217-00263-8.

13. ASM handbook. Vol. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. – S. 1.: ASM International, 1991. – 1328 p. – ISBN 978-0-87170-378-1.

14. ASM ready reference: thermal properties of metals. – S. 1.: ASM International, 2002. – 560 p. – ISBN 978-0-87170-768-0.

15. Shinohara K., Ueda F., Tanase T. Thermal expansion coefficient and thermal conductivity of WC based cemented carbides // *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*. – 1993. – Vol. 40, iss. 1. – P. 29–32. – DOI: 10.2497/jjspm.40.29.

16. Roebuck B., Gee M.G. Miniaturised thermomechanical tests on hardmetals and cermets // *Materials Science and Engineering*. – 1996. – Vol. 209, iss. 1–2. – P. 358–365. – DOI: 10.1016/0921-5093(95)10134-9.

17. Upadhyaya G.S. Materials science of cemented carbides – an overview // *Materials and Design*. – 2001. – Vol. 22, iss. 6. – P. 483–489. – DOI: 10.1016/S0261-3069(01)00007-3.

18. Wang H., Webb T., Bitler J.W. Study of thermal expansion and thermal conductivity of cemented WC–Co composite // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol. 49. – P. 170–177. – DOI: 10.1016/j.jrmhm.2014.06.009.

19. Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): a study of wear parts / P. Katiyar, P. Singh, R. Singh, A. Lava Kumar // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2016. – Vol. 54. – P. 27–38. – DOI: 10.1016/j.jrmhm.2015.06.018.

20. Ezquerro B.L., Rodriguez N., Sánchez J.M. Comparison of the damage induced by thermal shock in hardmetals and cermets // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2016. – Vol. 61. – P. 147–150. – DOI: 10.1016/j.jrmhm.2016.09.008.

21. A micromechanical constitutive modeling of WC hardmetals using finite-element and uniform field models / D. Tkalič, G. Cailletaud, V.A. Yastrebov, A. Kane // *Mechanics of Materials*. – 2016. – Vol. 105. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.11.007.

22. Álvarez E.A., García J.L., González Oliver C.J.R. Thermal cycling behavior of thin WC–Co sintered pellets // *Advanced Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 19, iss. 3. – DOI: 10.1002/adem.201600544.

23. Аматуни А.Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 140 с.

24. A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures / J.D. James, J.A. Spittle, S.G.R. Brown, R.W. Evans // *Measurement Science and Technology*. – 2001. – Vol. 12. – R1–R15. – DOI: 10.1088/0957-0233/12/3/201.

25. ГОСТ 3882–74. Сплавы твердые спеченные. Марки. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 13 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Thermal Coefficient of Linear Expansion of Tungsten-Cobalt Cemented Carbide

Igor Efimovich ^{a,*}, Ivan Zolotukhin ^b, Evgenii Zav'yalov ^c

Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-9060-4988>, egor_kosin@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1517-9117>, ivan.zolotukhin@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-1704-4734>, zavjaloves@tyuiu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 June 2019

Revised: 09 July 2019

Accepted: 15 August 2019

Available online: 15 September 2019

Keywords:

Thermal properties of materials
 Thermal coefficient of linear expansion,
 TCLE
 CTE
 Thermal deformation
 Thermal strain
 Thermal expansion of solids
 Dilatometry
 Thermomechanical analysis
 Tungsten-cobalt cemented carbide
 WC based cemented carbides
 WC-Co
 Sintered hard alloys

ABSTRACT

Introduction. Products containing cemented carbides (WC-Co), operating at high temperatures, experience large temperature deformations. The calculation accuracy of these deformations depends on the accuracy of the thermal coefficient of linear expansion (TCLE). In the literature, the data on the TCLE values for tungsten-cobalt cemented carbides vary significantly; TCLE type, experimental conditions are often not specified, and the correlation of TCLE and temperature is often neglected. **The purpose of the work.** The focus of this research is TCLE of tungsten-cobalt cemented carbide with different cobalt content in the range of 3-20 wt. %. The objective of the research is obtaining correlation between the linear thermal deformation and the temperature for tungsten-cobalt cemented carbide with different cobalt content and updating the TCLE values in view of its change as related to the temperature. **The methods of investigation.** The study used push-rod dilatometer Netzsch 402 PC to obtain experimental data in air. To eliminate low temperature distortions of the push-rod dilatometer due to the design features of this device a special method of experimental data processing is applied. This method includes calculation of true TCLE based on the deformations of the samples obtained from dilatometer; approximation the estimated TCLE by a linear function with its further integration by temperature for obtaining the correlation between the relative thermal deformation and temperature. **Results and Discussion.** The study obtained experimental values of linear thermal expansion in the range from 20 to 650°C and calculated true TCLE. It is found that a relationship of the true TCLE on the temperature is linear and calculated the coefficients of the corresponding approximating functions for different cobalt content. Also the study derived dependences of the relative thermal deformations of tungsten-cobalt cemented carbide for different cobalt content from the temperature, and provided the corresponding polynomial approximant coefficients. Moreover it is found, that with increasing the cobalt content, the value of TCLE and the rate of its change with temperature enlarge linearly. As the result study provides generalized formulas enabling to calculate for cemented tungsten carbide the relative thermal deformation, the true and mean TCLE based on the known temperature and cobalt content by weight. The results may help to calculate thermal deformation and stresses in a consisted cemented tungsten carbide products.

For citation: Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Zav'yalov E.S. Thermal coefficient of linear expansion of tungsten-cobalt cemented carbide. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 129–140. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140. (In Russian).

References

1. Hou W.-M., Thalmann R. Thermal expansion measurement of gauge blocks. *Proceedings SPIE*, 1998, vol. 3477. *Recent Developments in Optical Gauge Block Metrology*, pp. 272–278. DOI: 10.1117/12.323116.
2. Li Z., Jia H., Ma H., Guo W., Liu X., Huang G., Li R., Jia X. FEM analysis on the effect of cobalt content on thermal residual stress in polycrystalline diamond compact (PDC). *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, vol. 55, pp. 639–643. DOI: 10.1007/s11433-012-4654-4.

* Corresponding author

Efimovich Igor A., Ph.D. (Engineering), Assistant Professor
 Tyumen Industrial University
 38 Volodarskogo,
 625000, Tyumen, Russian Federation
 Tel.: +7 (3452) 50-49-15, e-mail: egor_kosin@mail.ru

3. Fang Z., Griffo A. Lockwood G.T., Liang D.-B. *Low coefficient of thermal expansion cermet compositions*. Patent US, no. US8323372, 2012.
4. Thiele S., Sempf K., Jaenicke-Roessler K., Berger L.-M., Spatzier J. Thermophysical and microstructural studies on thermally sprayed tungsten carbide-cobalt coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, iss. 1–2, pp. 358–365. DOI: 10.1007/s11666-010-9558-0.
5. Chandran M., Hoffman A. Diamond film deposition on WC–Co and steel substrates with a CrN interlayer for tribological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, vol. 49, no. 21. DOI: 10.1088/0022-3727/49/21/213002.
6. Altıparmak S. Analysis of thermal expansion and micro-delamination phenomenon of cutting tool thin surface coatings in high-speed dry machining. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 2018, vol. 4, iss. 2, pp. 189–211. Available at: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/618756> (accessed 16.08.2019).
7. Magunov A.N. *Lazernaya termometriya tverdykh tel* [Laser thermometry of solids]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 224 p. ISBN 5-9221-0222-2.
8. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Shvetsova E.I.). *Sposob opredeleniya temperaturnykh polei v rezhushchei chasti instrumenta v protsesse rezaniya* [Method for determination of temperature fields in the cutting part of the instrument in process of cutting]. Patent RF, no. 2442967, 2010.
9. Hidnert P. Thermal expansion of cemented tungsten carbide. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1936, vol. 18, pp. 47–52. Available at: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/18/jresv18n1p47_A1b.pdf (accessed 16.08.2019).
10. Kieffer R., Benesovsky F. *Hartmetalle*. Wien, Springer-Verlag, 1965. 546 p. DOI: 10.1007/978-3-7091-8127-0 (Russ. ed.: Kiffer R., Benesovskii F. *Tverdye splavy*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 392 p).
11. Tret'yakov V.I. *Osnovy metallovedeniya i tekhnologii proizvodstva spechennykh tverdykh splavov* [Fundamentals of metallurgy and production technology of sintered hard alloys]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 528 p.
12. Samoilov V.S., Eikhmans E.F., Fal'kovskii V.A., Loktev A.D., Shkurkin Yu.P. *Metalloobratyvyayushchii tverdospлавnyi instrument* [Metalworking carbide tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 368 p. ISBN 5-217-00263-8.
13. *ASM HandBook*. Vol. 2. *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. ASM International, 1991. 1328 p. ISBN 978-0871703781.
14. *ASM ready reference: thermal properties of metals*. ASM International, 2002. 560 p. ISBN 978-0-87170-768-0.
15. Shinohara K., Ueda F., Tanase T. Thermal expansion coefficient and thermal conductivity of WC based cemented carbides. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 1993, vol. 40, iss. 1, pp. 29–32. DOI: 10.2497/jjspm.40.29.
16. Roebuck B., Gee M.G. Miniaturised thermomechanical tests on hardmetals and cermets. *Materials Science and Engineering*, 1996, vol. 209, iss. 1–2, pp. 358–365. DOI: 10.1016/0921-5093(95)10134-9.
17. Upadhyaya G.S. Materials science of cemented carbides – an overview. *Materials and Design*, 2001, vol. 22, iss. 6, pp. 483–489. DOI: 10.1016/S0261-3069(01)00007-3.
18. Wang H., Webb T., Bitler J.W. Study of thermal expansion and thermal conductivity of cemented WC–Co composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, vol. 49, pp. 170–177. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.06.009.
19. Katiyar P., Singh P., Singh R., Lava Kumar A. Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): a study of wear parts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 54, pp. 27–38. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.06.018.
20. Ezquerria B.L., Rodriguez N., Sánchez J.M. Comparison of the damage induced by thermal shock in hardmetals and cermets. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 61, pp. 147–150. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.09.008.
21. Tkalic D., Cailletaud G., Yastrebov V.A., Kane A. A micromechanical constitutive modeling of WC hardmetals using finite-element and uniform field models. *Mechanics of Materials*, 2016, vol. 105. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.11.007.

22. Álvarez E.A., García J.L., González Oliver C.J.R. Thermal cycling behavior of thin WC-Co sintered pellets. *Advanced Engineering Materials*, 2017, vol. 19, iss. 3. DOI: 10.1002/adem.201600544.
23. Amatuni A.N. *Metody i pribory dlya opredeleniya temperaturnykh koeffitsientov lineinogo rasshireniya materialov* [Methods and instruments for determining the temperature coefficients of linear expansion of materials]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1972. 140 p.
24. James J.D., Spittle J.A., Brown S.G.R., Evans R.W. A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 12, R1–R15. DOI: 10.1088/0957-0233/12/3/201.
25. GOST 3882–74. *Splavy tverdye spechennye. Marki* [State Standard 3882–74. Sintered hard alloys. Types]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1998. 13 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).